УДК 533.95,538.4

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС ПОВЕРХНОСТИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА В ГИБРИДНОМ КОАКСИАЛЬНОМ МАГНИТОПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Д.Ю. Герасимов, А.А. Сивков, А.С. Сайгаш, Р.Р. Шарипов, С.И. Привезенцев

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета
E-mail: SivkovAA@mail.ru

На основании экспериментальных исследований установлены основные закономерности электроэрозионного износа поверхности ускорительного канала коаксиального магнитоплазменного ускорителя в связи с динамикой ускорения и колебаниями скорости плазмы. Предполагается, что колебания скорости обусловлены возникновением скачков уплотнения при сверхзвуковом течении плазмы в ускорительном канале. В рассматриваемой системе наиболее значимым фактором, определяющим электроэрозионный износ, является величина подведенной к ускорителю энергии. Отличительной особенностью является квадратичная зависимость величины износа от подведенной энергии. Полученные данные позволяют определить оптимальную геометрию ускорительного канала и необходимую энергетику для наработки и выноса из ствола требуемой массы материала.

Характерной особенностью кондукционных электродинамических ускорителей с плазменным поршнем является сильная электрическая эрозия поверхности электродов в ускорительном канале (УК). Для ускорителей макротел это явление носит негативный характер. Оно препятствует получению высоких скоростей метания из-за накопления в плазменной структуре (ПС) и вовлечения в движение большой паразитной массы эродированного материала [1], а так же исключает повторное использование ствола. С другой стороны это явление лежит в основе технологических электроэрозионных ускорителей плотной низкотемпературной плазмы [2]. Электроэрозионные ускорители используются для генерирования высокоскоростных струй электроразрядной плазмы, получения порошкообразных материалов, обработки твердых поверхностей и нанесения на них различных функциональных покрытий. Получение рабочего материала электроэрозионным путём с поверхности электродов в процессе ускорения является их отличием и преимуществом перед другими типами электрических ускорителей, например электротермическими.

Рассматриваемый в работе гибридный коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (КМПУ) также является электроэрозионным ускорителем [3]. Высокие кинетические параметры и эффективность преобразования энергии КМПУ обеспечиваются использованием гибридной схемы с одновременной реализацией всех основных способов преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию ускоряемой массы (электротермического и электротермохимического механизмов, кондукционной и индукционной электродинамики). КМПУ генерирует высокоэнтальпийные гиперзвуковые импульсные струи электроэрозионной плазмы с наработкой и выносом из ствола до нескольких десятков грамм эродированного материала. Это обеспечивает нанесение высокоадгезионных покрытий толщиной до 1,0 мм на твердые поверхности площадью порядка 100 см^2. Условия в ПС сильноточного разряда (с силой тока порядка 10^5 А) позволяют осуществлять динамический синтез сверхтвердых материалов: оксидов, карбидов, нитридов. Предельно высокая адгезия получаемых покрытий обусловлена образованием граничного слоя взаимного перемешивания материалов покрытия и подложки с плавно меняющимся составом толщиной 10...50 мкм. Установлено возникновение явления сверхглубокого проникания вещества гиперзвуковой плазменной струи в металлическую преграду [4].

Электроэрозионные процессы на поверхности электродов-направляющих в рельсовых электродинамических ускорителях и их влияние на динамику разгона плазменного поршня подробно проанализированы в многочисленных работах [5, 6]. Однако, рассматриваемая в настоящей работе гибридная коаксиальная ускорительная система имеет существенные отличия от рельсотрона. В ней поверхность цельнометаллического цилиндрического УК подвергается не только тепловому воздействию больших токов, протекающих через опорные дуговые пятна. В течение всего времени работы в УК в том или ином виде существует дуговой разряд типа *Z*-пинч, оказывающий тепловое воздействие на его поверхность. Это, естественно, должно повлиять на уровень электроэрозионного износа. В связи с этим исследование электроэрозионного износа поверхности УК КМПУ является актуальной задачей в плане изучения характера износа по длине ствола, выявления наиболее значимого фактора, определяющего его величину, и оптимизации конструкции ускорителя.

1. Устройство и принцип действия КМПУ. Методика исследований. Устройство и принцип действия КМПУ в режиме ускорения электроэрозионной плазмы при электропитании от емкостного накопителя энергии *C* показаны на рис. 1.

Исследования проведены в основном с использованием стволов – 2 из нержавеющей стали 12Х18Н9Т с диаметром УК от 16 до 24 мм. В исходном состоянии вершина центрального электрода – 1 электрически соединена с цилиндрической поверхностью УК в начале ствола пучком электровзрывающихся проводников (ЭВП). Такая конструкция узла центрального электрода и фонтанообразная конфигурация пучка ЭВП обеспечивают

формирование ПС сильноточного дугового разряда типа Z-пинч – 9. Для усиления стартовой динамики за счет использования электротермохимического механизма преобразования энергии, канал в изоляторе у вершины центрального электрода заполнялся водородонасыщенным газогенерирующим веществом (ГГВ) (техническим вазелином или трансформаторным маслом). Изменение геометрии этого канала, числа и размеров ЭВП, наличие или отсутствие ГГВ, позволяют регулировать ввод энергии, динамику ускорительного и электроэрозионного процессов.

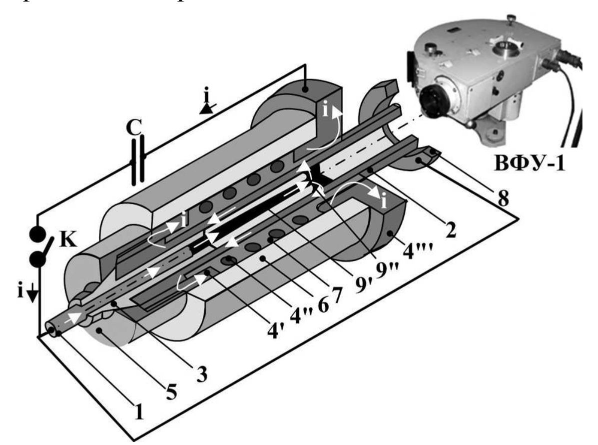
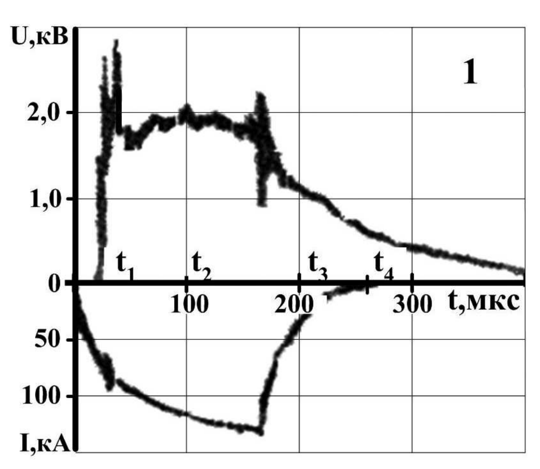


Рис. 1. Устройство и принцип действия КМПУ в режиме ускорения электроэрозионной плазмы: 1) центральный электрод; 2) электрод-ствол; 3) изолятор центрального электрода; 4) индуктор (4' – контактный цилиндр, 4'' – соленоид, 4''' – контактный фланец); 5) заглушка; 6) корпус; 7) изоляция; 8) шунтирующий электрод; 9) плазменная структура типа Z-пинч (9' – плазменный жгут, 9'' – круговая плазменная перемычка)

В экспериментах регистрировались рабочий ток $I(t)$ и напряжение $U(t)$ на электродах КМПУ. Подведенная к ускорителю энергия W определялась интегрированием кривой мощности. Она менялась путем изменения зарядного напряжения $U_{зар}$ от 2,0 до 4,0 кВ и емкости C конденсаторной батареи от 12 до 48 мФ. С целью сохранения условий ввода энергии, изменение W производилось также путем отсечки хвостовой части импульса тока с помощью системы шунтирования разряда. Динамика ПС в УК исследовалась с помощью высокоскоростной кадрированной фотосъемки на ВФУ-1, рис. 1. Фотокамера устанавливалась по продольной оси УК, и съемка производилась в срез ствола. Масса металла, эродированная с поверхности УК и вынесенная струей определялась взвешиванием ствола до и после выстрела. Характер износа по длине УК изучался путем разрезания отработанного ствола на отрезки длиной 10...20 мм, их взвешивания, определения разницы массы в сравнении с эталонным отрезком, построения и анализа эпюр дифференциального электроэрозионного износа.

2. Динамика ускорения плазмы и электроэрозионного износа. В момент времени t=0 (рис. 2) замыкается цепь электропитания и по обозначенному стрелками контуру (рис. 1) начинает протекать рабочий ток $I(t)$. В момент t_1 происходит электровзрыв проводников, сопровождающийся электровзрывным импульсом напряжения. Этот момент принят за начало работы ускорителя. По мере формирования ПС сильноточного дугового разряда напряжение снижается до уровня дуговой стадии и происходит ограничение скорости нарастания тока. Расширение разогретых разрядом газообразных продуктов термического разложения ГГВ, в составе которых более 10 % водорода, задает начальную динамику ускорения круговой плазменной перемычки, за которой вытягивается токоведущий плазменный жгут. Исходя из существующих представлений о конфигурации ПС в коаксиальном Z-пинч ускорителе предполагается, что устойчивое состояние ПС обеспечивается не только азимутальным магнитным полем собственного тока, но и аксиальным полем соленоида – 4 (рис. 1) внешней индукционной системы КМПУ. Так при силе токе 10^5 А и предполагаемом диаметре плазменного жгута 5,0 мм индукция этих составляющих равняется соответственно ~8 и ~3 Тл.



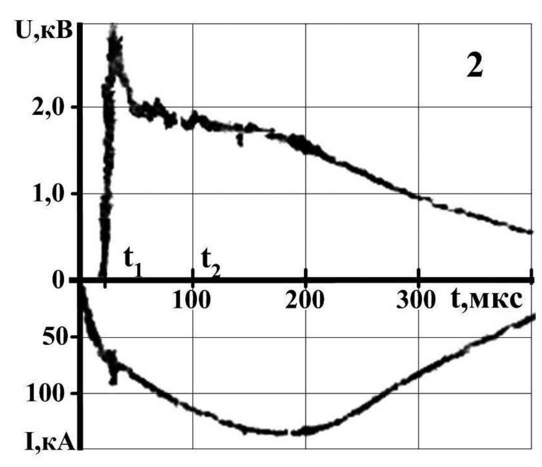


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на электродах U(t) и рабочего тока i(t). Номера осциллограмм соответствуют номерам опытов в таблице

В рассматриваемой коаксиальной магнитоплазменной системе, аналогичной коаксиальному рельсотрону, на ПС действует ускоряющая электродинамическая сила Лоренца. Высокоэффектив-

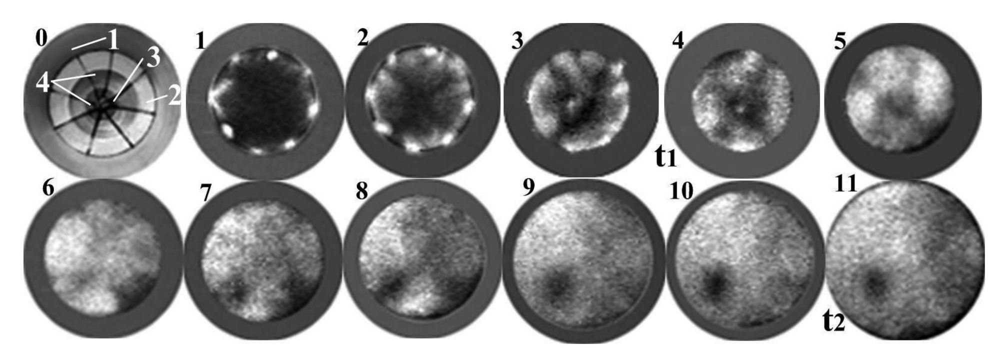


Рис. 3. *Фотограмма движения фронта ПС по УК.* $\Delta t_к$*=10,7 мкс*

ное ускорение плазмы до гиперзвуковых скоростей происходит в режиме нарастающего тока (рис. 2). Истечение плазмы из ствола начинается в момент t_2, установленный с помощью ВФУ-1 с точностью ±2,7 мкс (время экспозиции одного кадра), а также по осциллограммам в режиме работы КМПУ с шунтированием разряда на срезе ствола, рис. 2 (1).

На этих осциллограммах резкое снижение напряжения и тока в момент t_3, вызванное перекрытием плазмой и пробоем кольцевого зазора между срезом ствола – 2 и кольцевым электродом – 9 (рис. 1). Разряд в УК шунтируется цепью с малым сопротивлением и ток в нем быстро убывает до нуля. Момент t_3 легко регулируется изменением величины кольцевого зазора и положения кольцевого электрода относительно среза ствола. В пределе, при минимально возможном зазоре (~1 мм), момент t_3 практически совпадает с t_2. Осциллограммы на рис. 2 (2) соответствуют плазменному выстрелу при полном импульсе тока. Основные моменты и этапы ускорения ПС при однократном прохождении по УК видны на фотограмме съемки в срез ствола (рис. 3). Условия эксперимента: материал ствола – нержавеющая сталь, калибр УК d=24 мм, длина УК $\ell_{ук}$=266 мм, число ЭВП n=8 (медь, ∅0,5 мм, длина 16 мм), ГГВ – технический вазелин, массой 0,33 г, C=48 мФ, $U_{зар}$=3,0 кВ, внешняя среда – нормальные условия.

Фотоизображения представляют собой перспективу внутри УК. Большая глубина резкости объектива ВФУ-1 позволяет получать достаточно четкую съемку по всей длине УК. Внутренний круг – 2 торец изолятора центрального электрода – 3, внешняя окружность – срез ствола ускорителя, кольцо – 1 между указанными окружностями – поверхность УК, 4 – ЭВП. Симметрично расположенные по малой окружности светлые пятна – это искрение точек контакта ЭВП с поверхностью УК. В момент t_1 (кадр 4) происходит электровзрыв проводников, образуется неравномерно светящаяся круговая плазменная перемычка и начинается ее ускорение. На последующих кадрах видно увеличение ее диаметра и яркости свечения вследствие увеличения тока и приближения к объективу камеры ВФУ-1. Выход фронта ПС из УК соответствует t_2. Несколько затемненные области в центре и по периметру, неравномерность свечения фронта ПС могут говорить о ее фонтанообразной форме и дискретной структуре. Особенно хорошо это видно при визуализации кадрированной съемки в виде компьютерного видеоклипа. Кроме того, при его просмотре отчетливо видно вращение ПС при прохождении участка ствола, охваченного соленоидом. Выводы о вращении ПС и дискретности радиальных каналов проводимости в ней подтверждает визуальный анализ подверженной эрозии поверхности развернутого УК (рис. 4, *а*). На ней видно, что плазменно-эрозионный след состоит из дискретных треков, наклон которых максимален в начале и уменьшается к срезу ствола по мере увеличения скорости плазмы. На рис. 4, *б*, приведены эпюры удельного дифференциального электроэрозионного износа поверхности УК $\Delta m_s(\ell_{ук})$ по его длине, а в таблице данные соответствующих опытов. Эпюра 1 соответствует опыту с однократным прохождением ПС по УК и последующей отсечкой тока. Эпюра 2 показывает износ от полного импульса тока. Разница значений этих эпюр, представленная кривой 2-1, характеризует износ, вызванный выделением энергии после прохождения плазменной перемычки по стволу. Его равномерность (на участке длиной ~140 мм) свидетельствует о том, что характер износа задается первым прохождением.

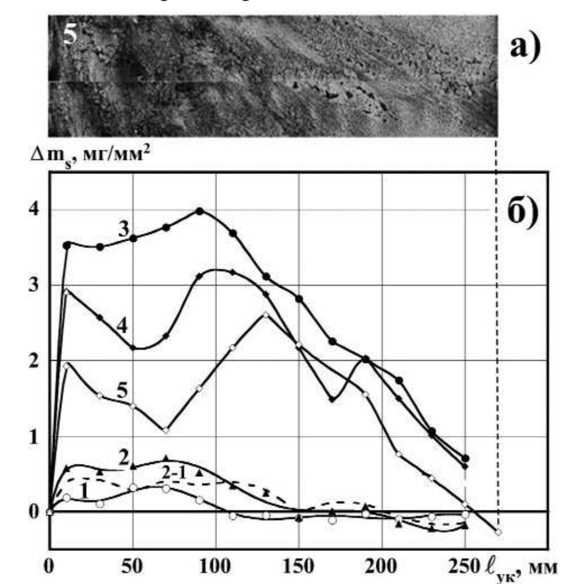


Рис. 4. *Фотография плазменно-эрозионного следа на поверхности УК (а), эпюры удельного дифференциального электроэрозионного износа* $\Delta m_s(\ell_{ук})$ *по длине УК (б). Номера соответствуют номерам экспериментов в таблице*

Сравнение эпюр 1, 2, 3 показывает, что Δm_s увеличивается с ростом тока, подведенной энергии и перенесенного заряда при одинаковых условиях работы ускорителя и его конструктивных параметрах. Увеличение диаметра УК приводит к уменьшению Δm_s даже при возрастании величин воздействующих факторов, что видно из сравнения эпюр 3, 4, 5 и данных таблицы.

Таблица. *Влияние энергетических и конструктивных параметров КМПУ на электроэрозионный износ поверхности УК*

Параметры / № опыта	Ед. изм.	1	2	3	4	5	6
Емкость накопителя, C	мФ	12	12	48	48	48	48
Зарядное напряжение, $U_{зар}$	кВ	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Длина ускорительного канала, $\ell_{ук}$	мм	271	272	272	269	274	266
Наружный диаметр УК, D	мм	20	20	20	25	32	32
Внутренний диаметр УК, d	мм	16	16	16	19	24	24
Максимальное напряжение, U_{max}	кВ	1,86	1,84	1,78	2,08	2,20	2,19
Максимальный ток, I_{max}	кА	133	139	159	140	140	144
Подведенная энергия, W	кДж	33,1	55,0	117,4	140,2	152,7	134,0
Эродированная масса, Δm	г	0,8	3,3	37,1	34,4	23,5	15,3
Удельная эродированная масса, $\Delta m/W$	г/кДж	0,024	0,060	0,316	0,246	0,154	0,116
Удельная подведенная энергия, W/V	кДж/см^3	0,608	1,010	2,144	1,836	1,235	1,114
Время ускорения головной части, Δt_{1-2}	мкс	75	75	61	69	80	80
Скорость на срезе УК, υ_c	км/с	4,3	4,2	5,1	4,5	3,5	3,4

Вид приведенных эпюр указывает на существование общих закономерностей электроэрозионного износа поверхности УК. Высокий уровень Δm_s на начальном участке обусловлен близостью устья канала в изоляторе центрального электрода, в котором максимально джоулево тепловыделение, низкой скоростью и вращением ПС. Далее наблюдается спад Δm_s с последующим, характерным для всех эпюр, возобновлением роста до некоторого максимума. Положение этого максимума смещается вправо, к срезу ствола, с увеличением энергии и диаметра УК. На оставшейся его длине Δm_s снижается до нуля с возможными последующими экстремумами (эпюра 4, рис. 4, *б*).

Такой характер эпюр Δm_s наталкивает на предположение о некой волновой природе динамики электроэрозионного износа по длине УК. Длина УК подверженного эрозии возрастает с увеличением энергии и в рассматриваемых условиях не превышает 280...320 мм независимо от длины соленоида внешней индукционной системы. На длине, превышающей эродированный участок, имеет место наслоение эродированного металла (Δm_s в опытах 1, 2, 5 принимает отрицательные значения). Поэтому эродированная с поверхности УК масса определялась интегрированием "положительного" участка эпюры $\Delta m_s(\ell_{ук})$. Интеграл "отрицательного" участка эпюры равен массе наслоенного металла, а полный интеграл соответствует массе вынесенного из ствола металла, равной разнице масс ствола до и после выстрела. Согласно полученным данным оптимальной длиной УК в режиме ускорения электроразрядной плазмы, в диапазоне подведенной энергии 50...150 кДж следует считать 200 мм, так как на ней происходит относительно равномерный износ и нарабатывается до 90 % эродированной массы металла.

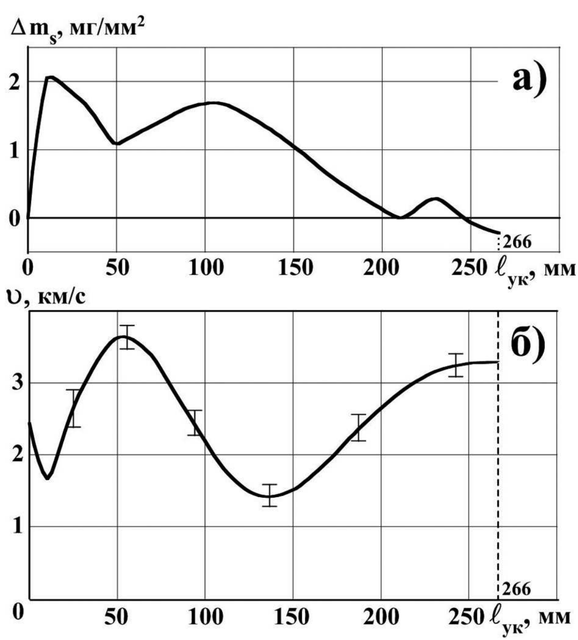


Рис. 5. *Изменение по длине УК: а) удельного дифференциального износа $\Delta m_s(\ell_{ук})$ и б) скорости фронта ПС $\upsilon(\ell_{ук})$*

На рис. 5 приведены результаты плазменного выстрела опыта 6, таблица. Кривая скорости фронта ПС получена путем обработки фотокадров съемки (рис. 3). Анализ показывает соответствие характера эпюры $\Delta m_s(\ell_{ук})$ и кривой скорости $\upsilon(\ell_{ук})$. Увеличение υ соответствует снижению Δm_s и наоборот. Отсюда следует, что чем выше скорость ПС, тем слабее тепловой поток со стороны движущегося разряда на стенку УК и меньше эрозия его поверхности. Волновой характер изменения скорости ПС, по всей вероятности, обусловлен газодинамическими закономерностями сверхзвуковых течений в каналах и соплах [7]. Динамика движения разряда дает основания предположить, что в УК формируется квазистационарный режим сверхзвукового течения с бочкообразной ударно-волновой структурой, с одним или несколькими скачками

уплотнения. В них имеет место снижение числа Маха (скорости), увеличение давления, плотности и температуры. Это предположение подтверждается результатами исследований ударных волн в разрядной и электромагнитной ударных трубах [8, 9]. К такому выводу склоняются авторы работ [10–13], в которых установлена сильная волновая неустойчивость скорости передней границы движущегося в рельсотроне разряда и его продольного размера. Там же показано, что ни одна из существующих моделей движения сильноточного разряда в магнитном поле не дает достаточно точного описания его поведения. В этой связи наиболее вероятным представляется доминирующее влияние процесса формирования классической для сверхзвуковых течений ударно-волновой структуры. Как и в случае КМПУ, в указанных работах установлено относительное постоянство напряжения на разряде в широком диапазоне изменения нарастающего тока и в квазистационарном режиме горения разряда.

Это позволяет предположить, что разряд в рельсотроне и круговая плазменная перемычка в КМПУ (в режиме ускорения плазмы) не компактны, а распределены на некоторой длине [11, 14]. Исходя из этого становится понятным сохранение характера электроэрозионного износа УК КМПУ в большом диапазоне изменения подведенной энергии, как в режиме работы с однократным похождением ПС по УК, так и при полном импульсе. При этом роль электромагнитного ускорения после начального формирования квазистационарного течения в стволе сводится к его поддержанию. Большая ширина основного "горба" на эпюрах износа обусловлена, по-видимому, некоторым перемещением скачка уплотнения вследствие нестационарности параметров течения, которые пропорциональны мощности разряда. Необходимо отметить, что в работе [5] для рельсового ускорителя установлено и волнообразное изменение коэффициента заполнения поверхности катода по его длине эрозионными пятнами ("привязками"), который прямопропорционален $\Delta m_э$. Однако сопоставления этих результатов с установленным волнообразным изменением скорости плазмы разряда сделано не было.

3. Интегральный электроэрозионный износ поверхности УК. С практической точки зрения необходимо знать величину удельного интегрального электроэрозионного износа относительно определяющего его наиболее значимого фактора. В работах, посвященных исследованию электрической эрозии электродов рельсовых ускорителей, интегральная эрозия принимается относительно величины электрического заряда $\int i(t)dt$, перенесенного движущимся разрядом $\int i^2(t)dt$ [1, 5], либо относительно интеграла действия [6]. И это понятно, так как в рельсотроне короткая плазменная перемычка, падение напряжения на которой не превышает ~500 В [1], один раз проходит вдоль направляющих и джоулево тепловыделение в объеме УК очень мало по сравнению с тепловым действием тока, протекающего через опорные пятна разряда на электродах. В рассматриваемой коаксиальной магнитоплазменной системе сильноточный дуговой разряд – 9, замыкаясь на центральный электрод – 1 (рис. 1), все время горит в УК, в котором выделяется вся подведенная энергия W. Анализ полученных экспериментальных результатов показал отсутствие корреляционной связи величины интегрального электроэрозионного износа Δm от перенесенного заряда и интеграла действия, но позволил установить определяющее влияние величины подведенной к ускорителю энергии. Ясно, что не вся энергия W тратится на нагрев поверхности и эрозию УК. Однако выделить эту долю не представляется возможным и не является необходимым для анализа процесса, так как его параметры во многом определяются и динамикой плазменного течения в конкретном ускорителе. С учетом этого обобщить все результаты удается в виде зависимости величины удельного интегрального электроэрозионного износа $\Delta m/W$ от величины удельной подведенной к ускорителю энергии W/V (V – объем УК) (рис. 6). Она аппроксимируется линейной функцией:

$$\Delta m/W = A(W/V - B) \qquad (*)$$

A=0,171, гсм^3/кДж^2 – коэффициент удельного интегрального эрозионного износа; B=0,368, кДж/см^3 – величина удельной критической подведенной энергии.

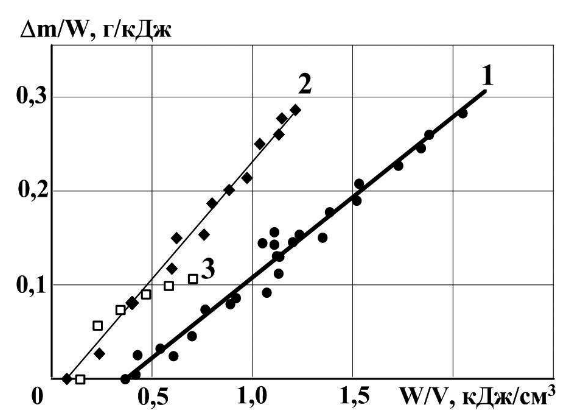


Рис. 6. *Зависимость Δm/W от W/V для: 1) КМПУ со стволами из нержавеющей стали; 2) КМПУ со стволами из меди; 3) рельсотрона с медными электродами*

Определяющий наклон зависимости коэффициент A не зависит от параметров контура электропитания, но меняется при изменении некоторых условий работы собственно ускорителя. В частности он увеличивается при отсутствии ГГВ в канале формирования ПС. Аналогичная зависимость 2 (рис. 6) для КМПУ с медным стволом аппроксимируется линейной функцией с коэффициентами: A=0,249, гсм^3/кДж^2; B=0,072, кДж/см^3. Бóльшее значение коэффициента А для меди (по сравнению с нержавеющей сталью), обусловлено в основном более низкой температурой плавления.

Из выражения (*) следует существование критической величины подведенной энергии, при которой электроэрозионный износ m практически отсутствует:

$$W_*=B\cdot V.$$

Это соотношение не лишено физического смысла. В эксперименте при $W=W_*$ на начальном участке поверхности УК (длиной до 40 мм) остаются лишь следы плавления, а вынос металла отсутствует. То есть B представляет собой критическое значение удельной (на 1 см^3 объема УК) подведенной энергии еще не вызывающее электроэрозионного износа в силу недостаточного прогрева металлической поверхности. Естественно, что для меди величина В ниже, чем для нержавеющей стали также из-за более низкой температуры плавления.

Зависимость 3 (рис. 6) построена в принятых нами координатах по экспериментальным результатам для рельсотрона с медными электродами, взятым в работе [6], с учетом приведенных данных по геометрии УК (сечение: 8×8 мм, длина: 100 мм) и постоянства сопротивления плазменной перемычки (~$0,7\cdot10^{-3}$ Ом). Там убедительно показано, что в рельсовом ускорителе плазмы величина унесенной массы линейно зависит от и, при постоянстве сопротивления разряда, от величины W. В отличие от рельсового ускорителя в КМПУ, как это следует из выражения (*), интегральный износ Δm имеет квадратичную зависимость от подведенной энергии W. По-видимому, это и обусловлено тем, что в КМПУ сильноточный разряд, замыкаясь на центральный электрод, все время горит по всей длине ускорительного канала, где и выделяется вся подведенная к ускорителю энергия. Вдвое меньшее значение В и существенное превышение $\Delta m/W$ (при W/V>0,5 кДж/см^3) в КМПУ по сравнению с рельсотроном, а также отличие функциональных зависимостей $\Delta m(W)$ (линейная для рельсотрона и квадратичная для КМПУ), обусловлены различием магнитоплазменных систем этих типов ускорителей.

Заключение

Из результатов экспериментальных исследований электроэрозионного износа поверхности УК КМПУ следует, что динамика и характер износа по длине ствола определяются газодинамическими закономерностями плазменного течения, а интегральный электроэрозионный износ имеет квадратичную зависимость от подведенной к ускорителю энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле / Под ред. чл.-корр. АН СССР М.Ф. Жукова. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1990. – 350 с.
2. Лукьянов Г.А. Сверхзвуковые струи плазмы. – Л.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
3. Сайгаш А.С., Герасимов Д.Ю., Сивков А.А. Нанесение функциональных покрытий на металлические поверхности с помощью гибридного коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Известия Томского политехнического университета. — 2005. — № 7. — С. 43–48.
4. Сивков А.А., Ильин А.П., Громов А.М., Бычин Н.В. Сверхглубокое проникание вещества высокоскоростного плазменного потока в металлическую преграду // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 1. – С. 42–48.
5. Лебедев А.Д., Малевинский К.В. Влияние структуры электродного материала на динамику плазменного поршня и эрозионные процессы // Матер. I Всес. семин. по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле. – Новосибирск, 1990. – С. 187–190.
6. Анисимов А.Г., Губарева Н.В., Мали В.И., Соболенко Т.М., Станкевич С.В., Чистяков В.П., Швецов Г.А. Взаимодействие плазменного сгустка с поверхностью электродов // Матер. I Всес. семин. по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле. – Новосибирск, 1990. – С. 195–207.
7. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. – М.: Наука, 1990. – 368 с.
8. Гречихин Л.И., Минько Л.Я. Получение и исследование ударных волн и сверхзвуковых плазменных потоков в разрядной ударной трубе // Журнал технической физики. – 1965. – Т. 35, вып. 8. – С. 1454–1460.
9. Бужинский О.И., Волков Л.П. Исследование ударных волн, возбуждаемых в электромагнитной ударной трубе // Журнал технической физики. – 1975. – Т. 17, вып. 8. – С. 1733–1739.
10. Железный В.В., Жуков М.Ф., Лебедев А.Д., Плеханов А.В. Влияние начальной динамики формирования плазменного проводника на эффективность работы электродинамического ускорителя // Журнал технической физики. – 1992. – Т. 62, вып. 3. – С. 126–136.
11. Лебедев А.Д., Назарчук В.И., Плюшкин А.П., Щербик Н.М. Экспериментальные исследования движения сильноточного дугового разряда в поперечном магнитном поле // Известия СО АН СССР. Серия техн. наук. – 1989. – Вып. 6. – С. 76–81.
12. Лебедев А.Д., Урюков Б.А. Импульсные ускорители плазмы высокого давления. – Новосибирск: СО АН СССР, Институт теплофизики, 1990. – 290 с.
13. Кухтецкий С.В., Лебедев А.Д., Любочко В.А. Движение сильноточного разряда в плотном газе // Теплофизика высоких температур. – 1985. – Т. 23. – № 3. – С. 422–429.
14. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1957. – Т. 33, вып. 1(7). – С. 3–8.